

Vergleich und Analyse verschiedener Messverfahren zur Bestimmung der Mindestzündenergie brennbarer Stäube

X. Li, S. Radandt, J. He, D. Lorenz

1 Einleitung

Ein wichtiges Kriterium für das Risikopotential eines Staub/Luft-Gemischs ist seine Zündempfindlichkeit [1 bis 3], die i. allg. durch die minimale Mindestzündenergie (MZE) beschrieben wird. Diese ist der Energiebetrag, der ein Staub/Luft-Gemisch zündwilligster Staubkonzentration gerade noch zur Explosion bringt. Die Messgröße MZE hängt von einigen Faktoren ab, wobei hier – weil besonders wichtig – der Turbulenzzustand, die Staubkonzentration und der Staubdispergierungszustand („Staubverteilungsqualität“) im Staub/Luft-Gemisch genannt seien [4 bis 6]. Wegen dieser Abhängigkeit können Unterschiede in den MZE-Messwerten für ein und denselben Staub auftreten, die in den verschiedenen konstruktiven Eigenschaften der gebräuchlichen Apparaturen zur Mindestzündenergiemessung begründet liegen. In dieser Arbeit werden drei unterschiedliche Apparaturen zur Bestimmung der MZE (Hartmann-Rohr, 20-l-Kugel, Fallrohr [7]) analysiert und miteinander verglichen. Ziel ist es dabei, diese Apparaturen in ihrer Leistungsfähigkeit zu charakterisieren und die mit diesen Methoden gewonnene Messgröße MZE in Bezug auf andere (nicht-elektrostatische) in der Nahrungsmittelindustrie vorkommende Zündquellen einzuschätzen.

Bei allen drei Apparaturen erfolgt die Gemischzündung mit Hilfe von elektrostatischen Entladungen, wobei man sich einer genormten Elektrodenanordnung und Zündapparat bedient. Differenzen in den MZE-Messergebnissen liegen daher hauptsächlich in den Unterschieden der Apparaturengeometrie und Generierungsmethode der explosiblen Staub/Luft-Gemische begründet. Genannte Randbedingungen beeinflussen in hohem Maße den zeitlichen und räumlichen Turbulenzzustand, die Staubkonzentration und die Staubverteilungsqualität im Messvolumen der betreffenden Mindestzündenergieapparatur. Die Analyse und der Vergleich der Apparaturen besteht darum aus einer Untersuchung des raum- und zeitabhängigen Turbulenz- und Staubdispergierungszustands sowie der Staubkonzentration.

Folgende Staubdispergierungsmethoden zur Erzeugung explosibler Staub/Luft-Gemisch bei der Bestimmung explosionstechnischer Kenngrößen (inklusive der MZE) sind gebräuchlich [8]:

- Druckluftmethode: Dispergierung mit Hilfe von Druckluft, wobei unterschieden wird zwischen der
 - Ausblasmethode: Staub wird pneumatisch über Rohrleitungen zum Messvolumen transportiert und in dieses möglichst homogen eingeblasen (20-l-Kugel),
 - Aufwirbelungsmethode: Im Untersuchungsvolumen abge-

Zusammenfassung Die Mindestzündenergie (MZE) ist ein Maß für die Zündempfindlichkeit von explosionsfähigen Gemischen. Sie dient neben anderen sicherheitstechnischen Kenngrößen zur Beurteilung des Gefahrenpotentials von Stoffen und zur Auswahl von Schutzmaßnahmen. In dieser Arbeit werden die Messverfahren und drei unterschiedliche Apparaturen zur Bestimmung der MZE von Staub/Luft-Gemischen (Hartmann-Rohr, 20-l-Kugel, Fallrohr mit Vibrationssiebspeisung) analysiert und miteinander verglichen. Analyse und Vergleich basieren auf der raum- und zeitabhängigen Untersuchung der Staubkonzentration und des Turbulenz- und Staubdispergierungszustandes in den Messvolumina der Apparaturen. Die Messung des Turbulenzzustandes geschieht mit Hilfe der Laser-Doppler-Anemometrie; zur Bestimmung des Staubdispergierungszustandes bzw. der Staubkonzentration werden eigene Methoden entwickelt. Die genannten Mindestzündenergieapparaturen werden nach ihrer Leistungsfähigkeit charakterisiert und die damit gewonnene Messgröße MZE in Relation zu anderen (nicht-elektrostatischen) in der Nahrungsmittelindustrie vorkommenden Zündquellen gesetzt.

Comparison and analysis of different measuring methods to determination of minimum ignition energy of combustible dusts

Abstract The minimum ignition energy (MIE) is a measure of ignition sensitivity for explosive mixtures. It is used among other safety characteristics to assess the hazard potential of dust and to select protective measures. In this paper the measurement methods of minimum ignition energy of dust/air-mixtures and three different test apparatus (Hartmann-pipe, 20 l-sphere, vertical duct with vibration sieve feeding) are analysed and compared. Analysis and comparison bases on a space and time dependent investigation of the dust concentration, the state of turbulence and dust dispersion inside the test volumina of the apparatus. The state of turbulence is measured by Laser-Doppler-anemometry; for the determination of the dust dispersion state and the dust concentration resp., individual methods are developed. The mentioned MIE apparatus are characterized according to their capability and the thus gained measuring size MIE is set in relation to other (non-electrostatic) ignition sources which occur in the food stuff industry.

lagerter Staub wird durch einen Druckluftstoß aufgewirbelt (Hartmann-Rohr).

– Kreislaufmethode: In einer Kreislaufströmung wird dispergierter Staub ständig mitgeführt.

• Fallmethode: Dispergierung des Staus im freien Fall durch Einbringung (z. B. durch Siebung) in eine definierte Fallstrecke (Fallrohr).

• Strömungsmethode: Dispergierung in einer stationären Strömung, welche die gravitationsbedingte Sinkgeschwindigkeit der Staubpartikeln gerade ausgleicht.

2 Turbulenzzustand

Die Höhe des MZE-Messwerts für explosible Staub/Luft-Gemische ist bis zu einem gewissen Grad des Turbulenz-

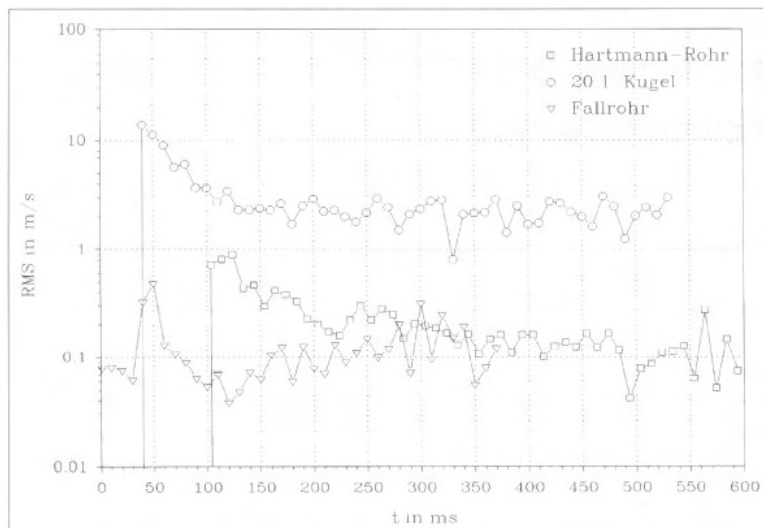


Bild 1 | RMS-Wert (vertikale Richtung) in Abhängigkeit von der Zeit am Zündort des Hartmann-Rohrs, der 20-l-Kugel und des Fallrohrs. Jede Kurve ist das Mittel aus mehreren Messungen. Der Punkt $t = 0$ ms markiert das Einblassignal.

zustands¹⁾ $\Psi(\vec{r}, t)$ stark von diesem abhängig. Bei Turbulenzzuständen unterhalb dieses Turbulenzgrads verändert sich der MZE-Messwert praktisch nicht mehr, oberhalb dieses Turbulenzgrads wächst er exponentiell an. Wegen dieser enormen Abhängigkeit ist der Turbulenzzustand $\Psi(\vec{r}, t)$ zum Zündzeitpunkt t_z am Zündort $\vec{r}_z$ des Untersuchungsvolumens bei MZE-Apparaturen von entscheidender Bedeutung für den MZE-Messwert. Bei der praktischen Bestimmung der MZE ist der Turbulenzzustand $\Psi(\vec{r}, t)$ abhängig von der Staubdispergierungsmethode (siehe Abschn. 1) und von der Zündverzögerungszeit²⁾. Da die Staubdispergierungsmethode durch den Typ der MZE-Apparatur vorgegeben ist und für jede Apparatur eine Messvorschrift existiert (fixe Zündverzögerungszeit), sollte der Turbulenzzustand $\Psi(\vec{r}, t)$ zumindest im Mittel charakteristisch für die jeweilige Apparatur sein. Die Messung von $\Psi(\vec{r}, t)$ in den drei unterschiedlichen MZE-Apparaturen soll diese Annahme auf Wahrheitsgehalt prüfen und zum Verständnis der Zahlenwerte der gemessenen MZE beitragen. Weiterhin wird durch diese Messungen die Basis für eine Optimierung von Staubdispergierungssystem und Zündverzögerungszeit gelegt.

Die Untersuchung von $\Psi(\vec{r}, t)$ erfolgt über eine Geschwindigkeitsmessung an den mit der Luft bewegten Staubpartikeln mit Hilfe eines Laser-Doppler-Anemometers (LDA) [9]. Der Turbulenzzustand $\Psi(\vec{r}, t)$ des Staub/Luft-Gemischs am Ort $\vec{r}_m$ und zur Zeit t_m wird dann mit der Standardabweichung zur Messgröße Partikelgeschwindigkeit v (RMS-Wert)

$$\Psi(\vec{r}_m, t_m) \Leftrightarrow RMS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}{n}} \quad \bar{v} = \frac{\sum_{i=1}^n (v_i)}{n} \quad (1)$$

identifiziert [10]. In Gl. (1) bedeutet n die Anzahl der Geschwindigkeitseinzelswerte v_i . $\bar{v}$ ist der Geschwindigkeitsmittelwert aus n Messungen. Bei der Bestimmung des RMS-Wertes entspricht der Messzeitpunkt t_m einem kleinen Zeitintervall (Zeitfenster), in dem die Geschwindigkeitswerte aufgenommen werden. Für unsere Versuche hat sich ein Zeitfenster von 10 ms als sehr geeignet erwiesen. Als Staub für die Untersuchungen wurde Maisstärke³⁾ gewählt.

2.1 Turbulenzzustand im Hartmann-Rohr

Das bei der BGN zur MZE-Bestimmung benutzte modifizierte Hartmann-Rohr besteht aus einem Glasrohr von 1,2 l Volumen. Dieses Rohr sitzt auf einem Metallfuß, in dem ein Zerstäubungspilz für die Staubdispergierung untergebracht ist. Durch einen Druckluftstoß mit Hilfe eines Kolbens wird wenig unterhalb des Zerstäubungspilzes abgelagerter Staub aufgewirbelt und so in das Untersuchungsvolumen dispergiert [11]. In einer Höhe von 102 mm oberhalb des Bodens des 1,2-l-Untersuchungsvolumens befindet sich der Zündort⁴⁾ auf der vertikalen Symmetrieachse des Glasrohrs. Über eine standardisierte elektrostatische Entladung nach einer vorgegebenen Zündverzögerungszeit wird das Staub/Luft-Gemisch zur Explosion gebracht [1]. Dieser Prozess wird mit immer kleiner werdenden Funkenenergien so lange wiederholt, bis keine Gemischzündung mehr erfolgt.

Während der Messungen des Turbulenzzustands wurden die Zündeletroden entfernt und das Untersuchungsvolumen mit einem Raster von Messpunkten versehen, wobei der Zündort zentral in diesem Raster lag. Die Partikel-Geschwindigkeitsmessung bzw. die RMS-Bestimmung wurde für die vertikale Richtung vorgenommen. Die Messungen an den einzelnen Rasterpositionen ergaben, dass für einen gegebenen Zeitpunkt der RMS-Wert stark von der vertikalen Höhe über dem Boden des Untersuchungsvolumens abhängt, jedoch gegen horizontale Ortsveränderung kaum anfällig ist. Mit zunehmender vertikaler Höhe nimmt der RMS-Wert schnell ab, wobei sich als Maximalwert 1,2 m/s bei der Höhe von 97 mm zeigte. In einer Höhe von 117 mm über dem Boden des Messvolumens wurde noch ein RMS-Maximalwert von 0,65 m/s registriert [12]. Für den Zündort (102 mm vertikale Höhe) ist der zeitliche Verlauf des RMS-Wertes in **Bild 1** wiedergegeben. Etwa 104 ms nach dem Einblassignal registrierte das LDA die ersten Teilchen. Der RMS-Wert beträgt zu diesem Zeitpunkt rund 0,7 m/s, steigt innerhalb der nächsten 20 ms auf ca. 0,9 m/s an und fällt dann während der folgenden 480 ms auf Werte um 0,1 m/s ab. Zwischen Einblassignal und Zündung liegt eine Zeitspanne von etwa 170 ms, d. h. zum Zündzeitpunkt beträgt der RMS-Wert am Zündort 0,37 m/s. Der zeitliche Verlauf des RMS-Werts in vertikaler Richtung am Zündort kann in guter Näherung mit der Regressionsgleichung

$$RMS(t) \Big|_{\text{vert}}^{\text{HR}} = 0,71 \cdot e^{\frac{t-104}{63,37}} + 0,12 \quad (2)$$

beschrieben werden. Die Indizes „vert“ und „HR“ stehen für „vertikale Geschwindigkeitsmessung“ und „Hartmann-Rohr“. Einen exponentiellen Abfall des Turbulenzzustands mit der Zeit sollte man bei der hier angewandten Staubdispergierungsmethode auch erwarten.

2.2 Turbulenzzustand in der 20-l-Kugel

Zur Bestimmung der MZE wird das Untersuchungsvolumen der Kugel bis auf einen Absolutdruck von 40 kPa evakuiert,

¹⁾ Dieser Grad des Turbulenzzustandes ist abhängig vom brennbaren Staub.

²⁾ Die Zeitspanne zwischen dem Beginn der Gemischerstellung und dem Aktivieren der Zündquelle.

³⁾ Der Medianwert dieser Maisstärke betrug 16,9 μm .

⁴⁾ Die Zündeletroden sind in die Wand des Hartmann-Rohrs (Glasrohr) integriert.

eine definierte Masse des zu untersuchenden Staubs über perforierte Ringdüsen in das Untersuchungsvolumen eingeblasen und das Staub/Luft-Gemisch schließlich über eine standardisierte elektrostatische Entladung nach einer vorgegebenen Zündverzögerungszeit zur Explosion gebracht [1]. Dieser Prozess wird mit immer kleiner werdenden Funkenenergien so lange wiederholt, bis keine Gemischzündung mehr erfolgt.

Wie zuvor beim Hartmann-Rohr wurden die Zündelektroden entfernt und im Untersuchungsvolumen der 20-l-Kugel einige Punkte für die Messung des Turbulenzzustands über der Zeit definiert. Wegen der Kugelsymmetrie befanden sich diese Messorte alle in der horizontalen Ebene, in der auch der Zündort liegt. Die Messergebnisse demonstrieren, dass die RMS-Werte (vertikale Richtung) zwar stark von der Zeit abhängen, jedoch nur schwach vom Messort. Die RMS-Kurven für jeden Messort zeigen im Rahmen der Messfehler denselben zeitlichen Verlauf wie die entsprechende Kurve aus Bild 1 (Kreissymbole). Letztere ist das Mittel aus mehreren Einzelmessungen für den Zündort im Zentrum der 20-l-Kugel. Wie man dieser Kurve entnimmt, erreichen rund 40 ms nach dem Einblassignal die ersten Staubteilchen den Zündort. Zu diesem Zeitpunkt beträgt der RMS-Wert etwa 14 m/s. Er nimmt mit der Zeit stark ab und beträgt rund 2,4 m/s zum Zündverzögerungszeitpunkt 160 ms. Die RMS-Werte wurden an den Messorten in der 20-l-Kugel auch für die horizontale Geschwindigkeitskomponente der Partikeln aufgenommen. Diese fallen gegenüber den RMS-Werten der vertikalen Geschwindigkeitskomponente höher aus [12]. Auch der für den Zündort innerhalb des 20-l-Messvolumens gemessene zeitliche Verlauf des RMS-Werts lässt sich durch eine Exponentialfunktion beschreiben:

$$RMS(t) \Big|_{\text{vert}}^{KU} = 12,06 \cdot e^{-\frac{t-40}{29,3}} + 2,19 \quad (3)$$

Wie beim Hartmann-Rohr wird das Staub/Luft-Gemisch mit einer gewissen Anfangsenergie in den Turbulenzzellen zur Verfügung gestellt, die sich mit der Zeit durch Reibungseffekte verbraucht. In beiden Systemen wird keine Energie nachgeliefert, weshalb der Abfall des RMS-Werts einem ähnlichen Gesetz folgt.

2.3 Turbulenzzustand im Fallrohr mit Vibrationssieb-speisung

Das Fallrohr ist eine neu entwickelte Apparatur zur verbesserten Messung von Mindestzündenergien brennbarer Staub/Luft-Gemische [7]. Ziel bei dieser Neuentwicklung war es, die Turbulenz im Untersuchungsvolumen so weit wie möglich zu unterdrücken, die Gemischzündung bei der gewünschten Staubkonzentration zu gewährleisten und eine gute sowie homogene Staubdispersion zu erreichen. Das Fallrohr besteht im Wesentlichen aus einem Plexiglasrohr ($H = 1$ m, $D = 0,11$ m), in das am oberen Ende der zu untersuchende Staub mit Hilfe eines Vibrationssiebs eingetragen wird. Innerhalb des Untersuchungsvolumens kann eine Luftströmung zur Verbesserung der Staubverteilung (Homogenität, Dispergierung) erzeugt werden. Am unteren Ende des Plexiglasrohrs sind die gleichen Zündelektroden positioniert, wie sie auch beim Hartmann-Rohr oder der 20-l-Kugel verwendet werden. Während des Staubeintrags wird am Zündort permanent die Staubkonzentration gemessen [13] und bei Erreichen des Sollwerts die Gemischzündung ausgelöst. Wie bei den anderen MZE-Apparaturen wird stufenweise der Energiebetrag des Zündfunkens so lange verringert, bis keine Gemischzündung

mehr erfolgt. Um die Dispergierung des Staubs zu verbessern, wird den Teststäuben 0,5 Gew.-% Aerosil untergemischt. Aerosilstaub ist ein kolloidales Siliziumdioxid, dessen Wärmekapazität sehr klein ist. Die Experimente mit Aerosil haben gezeigt, dass eine Beimischung solch kleiner Mengen dieses Stoffs keinen merklichen Einfluss auf die Explosionskennzahlen p_{max} , K_{st} und MZE hat [12].

Die vertikale Komponente der Partikelgeschwindigkeit wurde am Zündort in Abhängigkeit der Zeit mehrfach gemessen und daraus das Mittel der zeitlichen Entwicklung des RMS-Werts errechnet. In Bild 1 stellen sich die Messresultate als mehr oder weniger starke Schwankungen um den RMS-Wert 0,12 m/s dar (dreieckige Symbole). Dieses Ergebnis entspricht aufgrund der stetigen Erzeugung des Staub/Luft-Gemisches den Erwartungen. Wie die Messungen zeigen, wird die Forderung erfüllt, möglichst geringe Turbulenz im Untersuchungsvolumen des Fallrohrs vorzufinden.

3 Staubbkonzentration

Die Kenngröße minimale Mindestzündenergien (MZE) ist definiert als die Mindestzündenergie eines Staub/Luft-Gemischs bei optimaler Staubbkonzentration hinsichtlich der Gemischzündung [1]. Diese Konzentrationsangabe ist der Quotient aus der im Untersuchungsvolumen zu dispergierenden Staubbmasse und dem Untersuchungsvolumen selbst. Wie viel Staub von dieser Masse tatsächlich dispergiert wird und wie hoch die Konzentration zu einer bestimmten Zeit am Zündort ist, bleibt indessen unklar. Untersuchungen haben gezeigt, dass die MZE bei Zuständen hoher Turbulenz im Staub/Luft-Gemisch stark von der Staubbkonzentration abhängt. Bei niedrigen Turbulenzgraden im explosiblen Gemisch ist dieser Einfluss deutlich geringer [1]. Der zeitliche Verlauf des Turbulenzzustands in den drei hier untersuchten MZE-Apparaturen ist inzwischen bekannt (s. Abschn. 2), so dass für eine vollständige Charakterisierung dieser Apparaturen auch die zeitliche Entwicklung der Staubbkonzentration benötigt wird. Die Messung der Staubbkonzentration geschieht mit Hilfe der Absorption von Licht durch die dispergierten Staubbpartikeln, wobei das Lambert-Beer-Gesetz zur Anwendung kommt. Ein entsprechendes Gerät wurde in der zweiten Hälfte der achtziger Jahre von der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA) entwickelt. Wie bei den Untersuchungen zur Turbulenz wurde Maisstärke als Teststaub verwendet.

3.1 Staubbkonzentration im Hartmann-Rohr

Fünf Messorte wurden auf der zentralen vertikalen Achse des Hartmann-Rohr-Glasrohrs festgelegt (Zündort jeweils 3 cm und 6 cm ober- und unterhalb desselben). Für jeden dieser Orte wurden mit einer vorgegebenen Staubbkonzentration mehrere Messungen durchgeführt, wobei nach Beendigung eines Messdurchgangs die Staubbkonzentration variiert und die Messung wiederholt wurde [12]. Die Messergebnisse für die theoretischen Staubbkonzentrationen (Soll-Konzentrationen) 60 g/m^3 , 250 g/m^3 und 500 g/m^3 am Zündort des Hartmann-Rohrs sind in Bild 2 grafisch dargestellt (hohle Symbole). Zunächst bestätigt der zeitliche Verlauf dieser Staubbkonzentrationskurven, dass vom Einblassignal bis zum Erkennen der ersten Staubteilchen etwa 100 ms vergehen. Nach Erreichen eines Konzentrationsmaximums beginnt die Sedimentation des Staubs, was sich in den abfallenden Flanken der Staubb-

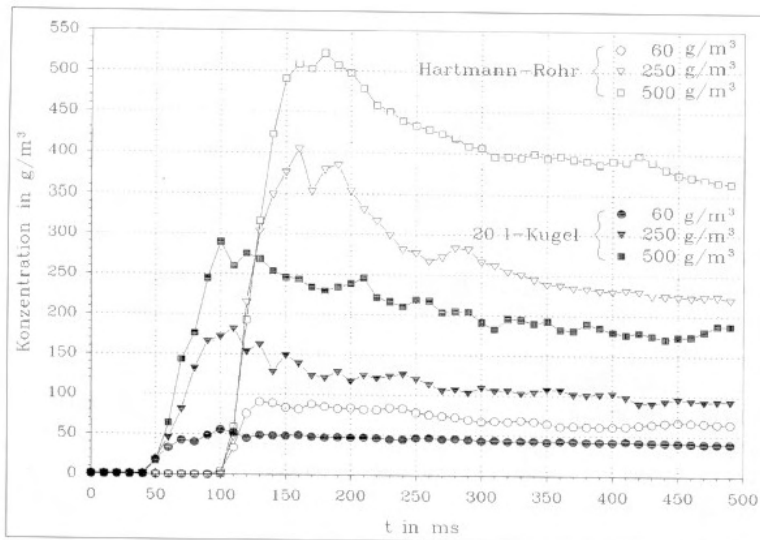


Bild 2 Staubkonzentration als Funktion der Zeit am Zündort des Hartmann-Rohrs, der 20-l-Kugel und des Fallrohrs. Jede Kurve ist das Mittel aus mehreren Messungen. Der Punkt $t = 0$ ms markiert das Einblassignal.

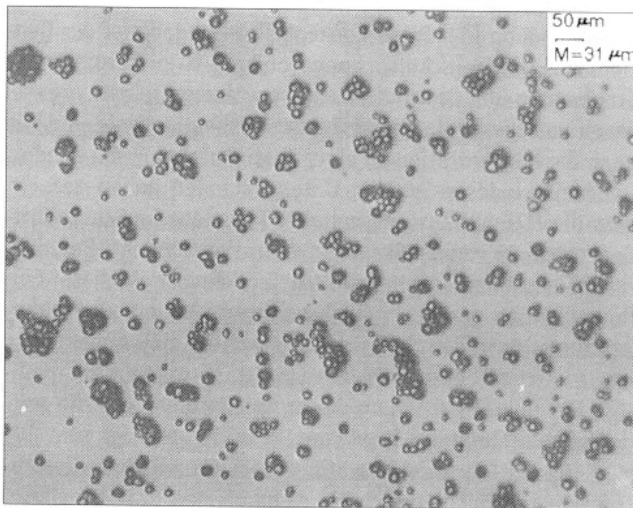


Bild 3 Dispergierungszustand von Maisstärke am Zündort im Hartmann-Rohr ($t = t_z$).

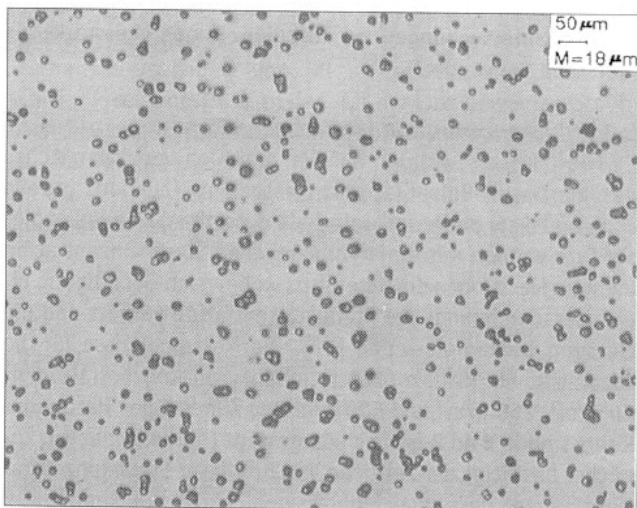


Bild 4 Dispergierungszustand von Maisstärke am Zündort in der 20-l-Kugel ($t = t_z$).

konzentrationskurven dokumentiert. Zum Zündzeitpunkt ($t_z = 170$ ms) liegen die gemessenen Staubkonzentrationen am Zündort stets über den Sollwerten (Fehler zwischen 4 % und 52 %). Weiterhin haben die Messungen gezeigt, dass die Staubkonzentration im Untersuchungsvolumen des Hartmann-Rohrs hochgradig inhomogen ist, d. h. sie hängt stark von der vertikalen Höhe über dem Boden des Untersuchungsvolumens ab. Dieses Verhalten ist der Grund für die Diskrepanz zwischen Soll- und Messwert der Staubkonzentration am Zündort zum Zündzeitpunkt [12].

3.2 Staubkonzentration in der 20-l-Kugel

Wegen der Kugelsymmetrie waren hier drei, um jeweils 6 cm versetzte Messorte in der den Zündort enthaltenden horizontalen Ebene ausreichend (Zündort, Randzone und dazwischen). Wie zuvor wurden mit den Soll-Konzentrationen 60 g/m^3 , 250 g/m^3 und 500 g/m^3 mehrere Messungen an jedem dieser Orte durchgeführt. Bei fester Soll-Konzentration ist die Form des zeitlichen Konzentrationsverlaufs unabhängig, die Konzentrationshöhe aber abhängig vom Messort. Die niedrigsten Konzentrationen wurden in der Randzone des Kugelvolumens gemessen, die höchsten zwischen Randzone und Zündort. Die Inhomogenität der Staubverteilung ist aber deutlich geringer als beim Hartmann-Rohr [12]. Am Zündort bewegt sich das Konzentrationsniveau zwischen dem der beiden anderen Messorte. In Bild 2 ist die Staubkonzentration am Zündort für o. g. Soll-Konzentrationen in Abhängigkeit der Zeit gezeigt (gefüllte Symbole). Wie man aus den Kurven ersieht, liegen zwischen Einblassignal und Sichtung der ersten Staubeilchen etwa 40 ms. Der zeitliche Abfall der Staubkonzentration ist flacher als beim Hartmann-Rohr, was auf einen besseren Dispergierungszustand der Staubeilchen schließen lässt (langsamere Sedimentation). Weiterhin fällt auf, dass die Staubkonzentration am Zündort durchweg unter der vorgegebenen Soll-Konzentration liegt. Dies hat seine Ursache darin, dass in den Ringdüsen stets ein Teil des einzubringenden Staubs zurückbleibt. Zum Zündzeitpunkt ($t_z = 160$ ms) betragen die relativen Abweichungen vom Sollwert der Staubkonzentration am Zündort zwischen 17 und 52 %.

4 Dispergierungszustand

Als dritter entscheidender Parameter für die Höhe des MZE-Messwerts wurde der Dispergierungszustand von Maisstärke am Zündort von Hartmann-Rohr, 20-l-Kugel und Fallrohr zum Zündzeitpunkt bestimmt. Zu diesem Zweck wurde eine Apparatur entwickelt, die eine Sonde mit haftenden Objektträgern sehr schnell zum Zündort innerhalb der MZE-Apparaturen und zur Ausgangsposition zurück befördert. Die Objektträger werden nach Probenahme unter dem Mikroskop untersucht. Die Steuerung dieser Apparatur war zeitlich so auf das Einblassignal der einzelnen MZE-Apparaturen abgestimmt, dass sich der Objektträger genau zum potentiellen Zündzeitpunkt am Zündort befand [12].

Am Zündort des Hartmann-Rohrs stellt sich der Grad der Partikeldispergierung zum Zündzeitpunkt so dar, wie es die typische Aufnahme aus Bild 3 zeigt. Dort ist deutlich zu sehen, dass ein großer Teil der Partikeln in Form von Konglomeraten von bis zu 20 Einzelpartikeln vorliegt. Als Medianwert M dieser Konglomerate wurden 31 µm abgeleitet.

Im Vergleich zum Hartmann-Rohr ist der Dispergierungsgrad der Maisstärketeilchen am Zündort der 20-l-Kugel zum Zündzeitpunkt t_z deutlich höher (siehe **Bild 4**). Die Partikeln liegen fast vollständig getrennt voneinander vor, was sich in einem Medianwert von $M = 18 \mu\text{m}$ widerspiegelt.

Bild 5 zeigt ein typisches Untersuchungsergebnis zum Dispergierungsgrad von Maisstärke zum potentiellen Zündzeitpunkt am Zündort des Fallrohrs. Auffällig ist die Dominanz riesiger Konglomerate, die den Medianwert dieser Teilchenzusammenballungen auf $62 \mu\text{m}$ heben. Hinsichtlich des Dispergierungsgrads ist das Fallrohr den anderen beiden Apparaturen somit unterlegen.

5 Mindestzündenergie

Abschließend wurden die minimale MZE verschiedener Stäube mit den drei untersuchten Apparaturen bestimmt und gegenüber gestellt. Die Ermittlung dieser MZE erfolgte in Anlehnung an [14; 15], d. h. für jede MZE-Apparatur wurde zunächst die zündwilligste Staubkonzentration bestimmt. Die Ergebnisse dieser MZE-Messungen sind in der **Tabelle** zusammengestellt. Aus dieser Tabelle ist zu ersehen, dass sich die mit Hartmann-Rohr und 20-l-Kugel gewonnenen MZE-Werte nur wenig unterscheiden. Die MZE-Werte, die das Fallrohr liefert, liegen jedoch deutlich über denen der anderen beiden Apparaturen.

Bezüglich der Reproduzierbarkeit der MZE-Messwerte ist das Hartmann-Rohr im Vorteil gegenüber der 20-l-Kugel, wie entsprechende Untersuchungen zeigten.

6 Schlussfolgerung

Betrachtet man die gemessenen Mindestzündenergien aus der Tabelle im Zusammenhang mit den Ergebnissen aus den Abschn. 2 bis 4, so muss man zu dem Schluss kommen, dass der Grad der Partikeldispergierung die entscheidende Rolle bei der MZE-Bestimmung spielt. Obwohl die RMS-Werte im Untersuchungsvolumen des Fallrohrs sehr niedrig sind und die optimale Staubkonzentration recht genau eingestellt werden kann, liegen die mit dem Fallrohr bestimmten minimalen Mindestzündenergien stets über den Werten, die mit den anderen beiden Apparaturen gemessen wurden [12]. Folglich müssen die mit dem Fallrohr erzielten relativ hohen MZE-Messwerte auf den schlechten Dispergierungsgrad der Staubeilchen im Untersuchungsvolumen zurückzuführen sein.

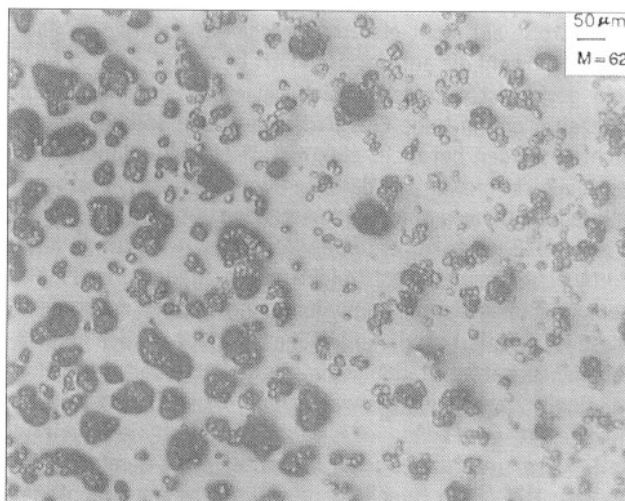


Bild 5 Dispergierungszustand von Maisstärke am Zündort im Fallrohr ($t = t_z$).

Blickt man auf die großen RMS-Werte im Untersuchungsvolumen der 20-l-Kugel, so sollte man erwarten, dass man mit dem Hartmann-Rohr aufgrund der wesentlich kleineren RMS-Werte die niedrigsten MZE-Werte misst. Diese scheinbare Benachteiligung der 20-l-Kugel gegenüber dem Hartmann-Rohr wird durch den besseren Dispergierungsgrad des Staubs im Untersuchungsvolumen der 20-l-Kugel wieder ausgeglichen. Weil man mit der 20-l-Kugel und dem Hartmann-Rohr in etwa gleich große MZE-Werte misst, müssen obige Überlegungen zu dem Schluss führen, dass sowohl mit der 20-l-Kugel (wegen der hohen RMS-Werte) als auch mit dem Hartmann-Rohr (wegen der schlechteren Staubeispergierung) zu hohe MZE-Werte gemessen werden. Es bleibt also festzuhalten, dass eine optimale Apparatur zur Messung der minimalen Mindestzündenergie brennbarer Stäube der Allgemeinheit nach wie vor nicht zur Verfügung steht. Zur Auslotung neuer unterer Grenzen der MZE ist anzustreben, entweder das Staubeintragsystem beim Fallrohr zu verändern oder den Dispergierungszustand im Hartmann-Rohr zu verbessern oder aber den RMS-Wert in der 20-l-Kugel zu senken. Darüber hinaus ist es geboten, die räumliche Inhomogenität der Staubkonzentration bzw. die Abweichung vom Konzentrationsollwert in den Untersuchungsvolumina von Hartmann-Rohr und 20-l-Kugel zu beseitigen.

Ein weiteres Problem im Zusammenhang mit der heute gebräuchlichen Kenngröße MZE ist es,

Ergebnisse der MZE-Messungen mit Hartmann-Rohr (HR), 20-l-Kugel (KU) und Fallrohr (FR).

Die RMS-Werte betragen am Zündort zum Zündzeitpunkt:

$$RMS(t_z)_{\text{vert}}^{\text{HR}} = 0,37 \text{ m/s},$$

$$RMS(t_z)_{\text{vert}}^{\text{KU}} = 2,4 \text{ m/s},$$

$$RMS(t_z)_{\text{vert}}^{\text{FR}} = 0,12 \text{ m/s}.$$

Die Zeit zwischen Einblatssignal und Zündzeitpunkt betrug beim Hartmann-Rohr 170 ms bzw. 160 ms bei der 20-l-Kugel. Die Produktfeuchte F ist in Gew.-% angegeben, die MZE in mJ (unterer Wert | oberer Wert). +A steht für eine Beimischung von 0,5 Gew.-% Aerosil, M ist Maisstärke, W bedeutet Weizenmehl Typ 550 und L symbolisiert Lycopodium. Bei den mit * gekennzeichneten Versuchen wurde keine Induktivität im Entladekreis des Funkengenerators verwendet.

Gerät	HR*	HR	HR*	HR	HR*	HR	HR*	HR	HR*
F	2,17	2,17	2,17	2,17	1,85	1,85	1,85	1,85	0,54
Staub	M+A	M+A	M	M	W+A	W+A	W	W	L
MZE	90 100	3 4	90 100	3 4	100 200	8 9	100 200	10 20	90 100

Gerät	HR	KU*	KU	KU*	KU	KU*	KU	KU*	KU
F	0,54	2,17	2,17	2,17	2,17	1,85	1,85	1,85	1,85
Staub	L	M+A	M+A	M	M	W+A	W+A	W	W
MZE	8 9	70 80	3 4	50 60	3 4	80 90	4 5	90 100	20 30

Gerät	KU*	KU	FR*	FR	FR*	FR	FR*	FR	
F	0,54	0,54	2,17	2,17	1,85	1,85	0,54	0,54	
Staub	L	L	M+A	M+A	W+A	W+A	L	L	
MZE	90 100	6 7	100 200	9 10	100 200	10 20	100 200	10 20	

diese Größe auf nicht-elektrostatische Zündquellen zu übertragen. Obwohl die auf klassische Art gemessene MZE oftmals sehr gering ist, entwickeln sich bei einer Funkenentladung kurzzeitig enorm hohe Energiedichten [16]. Solche Energiedichten werden bei nicht-elektrostatischen Zündquellen bei weitem nicht erreicht, so dass die Gefahr besteht, überzogene Schutzmaßnahmen im produzierenden Gewerbe aufgrund kleiner MZE-Werte zu ergreifen. Um dies zu verhindern hat Bartsch versucht, nicht-elektrischen Zündquellen eine so genannte elektrische Äquivalentenergie (EÄ) zuzuordnen. Diese ist definiert als diejenige Energie einer zeitlich gedehnten Kondensatorentladung, die die gleiche Zündwirksamkeit in einem gegebenen Brennstoff/Luft-Gemisch hat wie die nicht-elektrische Zündquelle. Dabei ergab sich die Schwierigkeit, dass unterschiedliche Brennstoff/Luft-Gemische mit gleicher MZE völlig verschiedene elektrische Äquivalentenergien haben können. Die EÄ ist um so niedriger, je höher die Kenngröße Zündtemperatur des Brennstoff/Luft-Gemisches ist. Dieses unerwartete Verhalten liegt in der Bestimmungsmethode der EÄ begründet [1]. Wegen der Abhängigkeit der EÄ von der Zündquellenart und der Kenngröße Zündtemperatur ist die Bestimmung der EÄ-Werte für ein gegebenes Brennstoff/Luft-Gemisch äußerst arbeitsintensiv. Ziel sollte es daher sein, eine einzige Größe zu finden, mit der die Zündempfindlichkeit eines Brennstoff/Luft-Gemisches charakterisiert werden kann. In [16] wird z. Z. neben anderen physikalischen Größen die Energiedichte von elektrostatischen Standardzündfunken orts- und zeitaufgelöst gemessen. Diese Messresultate werden zeigen, wie lange eine gegebene Energiedichte wirksam sein muss, bis es zur Zündung eines explosiblen Brennstoff/Luft-Gemisches kommt. Damit kann man einem explosiblen Gemisch eine minimale zeitliche Energiedichte als universelle Kenngröße zur Charakterisierung der Zündempfindlichkeit zuordnen. Solche zeitlichen Energiedichten ließen sich auch für alle anderen in Frage kommenden Zündquellen angeben, womit eine Einschätzung der Zündgefahr durch diese Zündquellen möglich würde.

Literatur

- [1] Bartsch, W.: Explosionsschutz. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1993.
- [2] Eckhoff, R. K.: Dust explosions in the process industries. London: Butterworth-Heinemann 1991.
- [3] Radandt, S.: Mindestzündenergie unter veränderten Einflussgrößen. VDI Berichte Nr. 975 (1992), S. 183-205.
- [4] Berthold, W.: Bewertung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen. VDI Berichte Nr. 701 (1988), S. 187-194.
- [5] Pu, Y.-K.; Jarosinski, J.; Johnson, V. G.; Kauffmann, C. W.: Turbulence effects on dust explosions in the 20-liter spherical vessel, Twenty-Third Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute (1990), S. 843-849.
- [6] Radandt, S.; Vogl, A.: Brand- und Explosionsgefahren. Heidelberg: Roland Asanger 1992.
- [7] Seithel, M.: Entwicklung und Aufbau einer Laborapparatur zur Erzeugung explosionsfähiger Staub/Luft-Gemische in laminarer Strömung. Bericht Nr. F-05-9303-4 (unveröffentlicht) der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA), Mannheim 1997.
- [8] Pu, Y.-K.; Yuan, S.-X.: Überblick über die Untersuchungen der Staubeexplosionen, Staubeexplosionsschutz in der Industrie. Wissenschaftlicher und Technischer Verlag in China (1990), S. 345-360.
- [9] Ruck, B.: Laser-Doppler-Anemometrie. Stuttgart: AT-Fachverlag 1987.
- [10] Hauert, F.; Vogl, A.; Radandt, S.: Dust cloud characterization and its influence on the pressure-time-history in Silos. Reprint of Process Safety Progress 1996.
- [11] Drechsler, B.: Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen in Abhängigkeit vom Klimaparametern. Diplomarbeit Fachhochschule für Technik, Mannheim 1991.
- [12] Li, X.: Vergleich und Analyse verschiedener Messverfahren zur Bestimmung der Mindestzündenergie brennbarer Stäube. Dissertation (in Vorbereitung), North-East University Shenyang, PR China 1999.
- [13] Vogl, A.: Staubbemessung. Verband der Schadenversicherer. Fachtagung Staubeexplosionsschutz 1995.
- [14] Berthold, W.: Bestimmung der Mindestzündenergie von Staub/Luft-Gemischen. Fortschr.-Ber. VDI Reihe 3, Nr. 134. Düsseldorf: VDI-Verlag 1987.
- [15] VDI 2263 Blatt 1: Staubebrände und Staubeexplosionen, Gefahren – Beurteilung – Schutzmaßnahmen: Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von sicherheitstechnischen Kenngrößen von Stäuben. Berlin: Beuth 1990.
- [16] Lorenz, D.; Schiebler, H.; Ott, H.; Seithel, M.; Li, X.: Zündmechanismen von Staubeexplosionen. Bericht Nr. F-05-9303 (in Vorbereitung) der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin (FSA), Mannheim 1999.

Aus der Regelungsarbeit der EU

Neue Richtlinien der Europäischen Union zu Gefahrstoffen

In den Amtsblättern der Europäischen Gemeinschaft sind folgende Regelungen zu Gefahrstoffen veröffentlicht worden:

Verordnung (EG) Nr. 1972/1999 der Kommission vom 15. September 1999 zur Änderung der Verordnung (EWG) Nr. 3600/92 mit Durchführungsbestimmungen für die erste Stufe des Arbeitsprogramms gemäß Artikel 8 Absatz 2 der Richtlinie 91/414/EWG des Rates über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln

Die Prüfung von Wirkstoffen, die zwei Jahre nach der Notifizierung der Richtlinie 91/414/EWG bereits im Handel wa-

ren, wird von der Kommission im Rahmen eines koordinierten gemeinschaftlichen Programms durchgeführt, das mit der Verordnung (EWG) Nr. 3600/92 festgelegt wurde. Um interessierten Parteien so früh wie möglich Zugang zu aktualisierten Informationen zu ermöglichen, die in diesem Zusammenhang von Bedeutung sind, wird die Verordnung in der Weise geändert, dass die Informationen benannt werden, die den interessierten Parteien zukünftig zugänglich sein sollen. ABL. EG Nr. L 244 vom 16. September 1999, Seite 41.